第 31 卷第 5 期
2025 年 10 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 31 No. 5
Oct. 2025

引用格式：韩润生，张艳，罗进，等，2025. 受断裂控制的热液矿床矿体（群）侧伏规律及力学机制[J]. 地质力学学报，31（5）：886−897. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025121

Citation: HAN R S，ZHANG Y，LUO J，et al.，2025. Plunge law and mechanical mechanisms of fault-controlled ore bodies (clusters) in hydrothermal deposits[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：886−897. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025121

受断裂控制的热液矿床矿体（群）侧伏规律及力学机制

韩润生[1,2]，张　艳[1,2]，罗　进[3]，黄保胜[3]，胡体才[3]
HAN Runsheng[1,2]，ZHANG Yan[1,2]，LUO Jin[3]，HUANG Baosheng[3]，HU Ticai[3]

1. 昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650093；
2. 有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所，云南 昆明 650093；
3. 云南驰宏锌锗股份有限公司，云南 曲靖 655099
1. *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *Yunnan*, *China*;
2. *Southwest Geological Survey*, *Nonferrous Metals Minerals Geological Survey Center*, *Kunming* 650093, *Yunnan*, *China*;
3. *Yunnan Chihong Zn & Ge Co.*, *Ltd.*, *Qujing* 655099, *Yunnan*, *China*

Plunge law and mechanical mechanisms of fault-controlled ore bodies (clusters) in hydrothermal deposits

Abstract: ［**Objective**］Hydrothermal mineral deposits provide a representative example of tectonic–fluid coupled metallogenic systems, and the lateral plunge law of ore bodies or ore body clusters constitutes their three-dimensional expression in geological space, yet the determination of pitching direction and pitching angle has long been one of the most difficult problems in prospecting prediction. ［**Methods**］This study aims to address the major challenges in understanding plunge law and mechanical mechanisms, namely the difficulty of identifying ore body pitching under multiphase tectonic superposition, the lack of clarity in the control mechanisms of ore body cluster pitching, and the insufficiency of empirical studies on deep ore body pitching models. Based on Theory and Methods of Orefield Geomechanics, breakthroughs were achieved in multiphase structural recognition and the identification of control mechanisms, allowing systematic summarization of plunge law associated with compressional–shear, extensional–shear or transtensional, ductile shear zone or brittle shear belt, and composite structural controls, together with detailed analysis of their mechanical mechanisms and the proposal of practical methods for determining pitching. ［**Results**］The results indicate that in hydrothermal deposits, ore body pitching is strictly controlled by the mechanical properties, kinematic behavior, and spatial configuration of the dominant ore-controlling structures during mineralization: the pitching direction of ore bodies or clusters is consistent with the movement of the hanging wall of the controlling fault, while the pitching angle is governed by the fault dip, the proportion of shear components, the undulatory amplitude of fault planes, and the orientation of the regional principal stresses. Ore bodies controlled by transpressional or transtensional faults exhibit more pronounced pitching than those associated with simple compressional–shear or extensional–shear structures; for single ore bodies or vein clusters, pitching direction may coincide with that of the cluster in transpressional or compressional–shear systems, or conversely oppose it in transtensional or extensional–shear systems; where ductile shear zones control mineralization, pitching is parallel to

基金项目：国家自然科学基金项目（42172086，42472127）；云南省矿产资源预测与评价工程研究中心项目（2011）；云南省昆明理工大学创新团队项目（2012）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42172086 and 42472127), the Project of the Yunnan Provincial Engineering Research Center for Mineral Resources Prediction and Assessment (2011), and the Project of the Yunnan Kunming University of Science and Technology Innovation Team (2012).

第一作者：韩润生（1964—），男，研究员，博士生导师，从事构造成矿动力学与隐伏矿预测、矿床学研究。Email：554670042@qq.com
通信作者：张 艳（1981—），女，教授，博士生导师，从事隐伏矿预测、矿床学研究。Email：78598874@qq.com

收稿日期：2025−09−02；**修回日期**：2025−10−22；**录用日期**：2025−10−22；**网络出版日期**：2025−10−22；**责任编辑**：王婧

stretching lineations, while brittle shear belts produce pitching that follows extension–compression directions; in composite structural systems, the determination of pitching requires careful analysis of inherited, superimposed, or transformed tectonic elements to establish the effective mode of control. Mechanically, the pitching direction corresponds to the orientation of maximum permeability of metallogenic fluids within the ore-controlling stress field: in compressional–shear or transpressional faults, pitching is constrained by the sense of shear displacement; in transtensional faults, it is determined by the orientation of dominant fluid channels; and in ductile shear zones, it follows the *X*-axis of the strain ellipsoid. [**Conclusion**] These findings confirm that the mechanics and kinematics of ore-controlling structures are the primary factors dictating the occurrence of pitching in ore bodies and clusters, but they also highlight that the regularities differ between structural hierarchies, with the behavior of ore body clusters not entirely identical to that of single ore bodies, and that the observed patterns reflect the combined action of the metallogenic stress field, fluid dynamics, and the physical properties of host rocks. On this basis, several methods are recognized as effective for inferring the pitching of concealed ore bodies, including structural analysis of mineralizing faults, tracing zoning trends of mineralization and alteration, projection of ore column centroids, and three-dimensional spatial analysis of exploration engineering data, while the integration of structural geochemical and geophysical anomaly analyses can significantly enhance the reliability of pitching prediction in deep concealed settings, thereby opening new avenues for deep ore prospecting and achieving high efficiency in exploration.[**Significance**] The significance of this study lies not only in its practical applications—guiding deep and peripheral prospecting, improving mineral resource evaluation in exploration areas, optimizing the deployment of exploration projects, and enabling more accurate estimation of reserves—but also in its theoretical contributions, particularly in advancing the understanding of the metallogenic dynamics of hydrothermal deposits by linking structural mechanics, stress fields, fluid migration, and rock physical properties in a unified framework for explaining ore body pitching.

Keywords: plunge law of ore bodies (cluster)**;** mechanical mechanisms**;** plunge determination methods**;** geophysical and geochemical anomaly analysis**;** hydrothermal deposits

摘　要：热液矿床中，矿体（群）的侧伏规律是构造-流体耦合成矿系统在三维空间的具体表现，但确定其侧伏向和侧伏角一直是找矿预测的难题之一。文章聚焦矿体（群）侧伏规律及其力学机制研究中存在的主要问题（多期构造叠加造成的矿体侧伏识别难、矿体群侧伏控制机制不清、深部矿体侧伏模型实证研究不足等），基于矿田地质力学理论与方法，突破多期构造识别、矿体群侧伏控制机制等瓶颈，研究总结了压扭性、张扭性/扭张性、剪切带/扭性为主断裂带及复合构造控制的矿体（群）的侧伏规律，并解析其力学机制，提出矿体（群）侧伏确定方法。研究表明，成矿断裂构造的力学、运动学及其倾向、倾角共同控制矿体（群）侧伏产状，其侧伏向与成矿断裂下降盘运动方向一致，侧伏角受成矿构造应力场水平分量或成矿构造运动方向与断裂走向夹角的大小控制；不同级序构造控制的矿体群与单个矿体的侧伏规律不完全一致。在此基础上，认为成矿构造解析、矿化蚀变分带趋势追索、矿柱中心点投影及勘查工程数据三维空间分析是推断隐伏矿体（群）侧伏的主要方法，构造地球化学和地球物理异常分析等方法，可显著提升深部隐伏矿体（群）侧伏预测的可靠性，有望打开深部找矿新局面，取得事半功倍之功效。该研究在指导矿山深部和外围找矿预测与勘查区矿产评价、优化勘查工程部署、深化热液矿床成矿动力学机制及准确估算资源储量等方面具有重要意义。

关键词：矿体（群）侧伏规律；力学机制；侧伏确定方法；物化探异常分析；热液矿床

中图分类号：P548　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-6616(2025)05-0886-12

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025121

0　引言

无论是岩浆热液矿床，还是受构造控制的非岩浆后生热液矿床，矿体(群)侧伏规律是热液矿床中的重要规律之一(Vearncombe, 2023; Lutz, 2023)。如何确定热液矿床中断裂控制的隐伏矿体(群)空间定位的侧伏规律一直是找矿预测的难题之一。深部矿体群在地下三维空间如何摆布，尤其是矿体如何侧伏，是关乎经济且快速地查明矿体深部延展格局和圈定深部找矿靶区、实现增储上产的关键科学

问题。其研究意义主要表现在以下5个方面。①指导矿产评价与深部找矿突破。矿体(群)常沿侧伏方向延深，掌握其侧伏规律是开展区域内同类矿床评价和研判深部矿体延展格局(韩润生和赵冻，2022；韩润生等，2023a，2023b)并取得找矿突破的关键依据。例如，基于云南会泽麒麟厂、矿山厂铅锌矿床和毛坪铅锌矿床的矿体群侧伏规律，开展找矿预测研究，取得了深部及外围找矿突破(韩润生等，2019，2022)。②优化勘查工程部署，提高矿体发现效率。依据侧伏方向和侧伏角，能科学设计勘查工程的空间布置、方位和倾角，使勘查工程沿最优路径穿透隐伏矿体，从而使勘查工程量最小且显著提升深部勘查效果。③深化热液矿床成矿动力学机制认识。矿体(群)侧伏主要受成矿构造和岩性接触带等因素控制，其侧伏方向反映成矿构造应力场特征(Davies et al., 2025)，将应力场分析、通道流模拟、三维预测算法紧密结合，研究其规律有助于揭示矿床形成机制和空间定位模式，为深化构造控矿规律研究和重建成矿流体运移路径提供依据(Cox et al., 2001)。④推进三维建模精准化(Xuan et al., 2024)，准确估算资源储量。基于侧伏规律，建立矿体空间分布模型(Combes et al.)，可显著降低资源储量估算误差。⑤减少无效工程，提高采矿效率。采矿设计和开拓系统(如竖井、斜坡道位置，中段高度与工程方位等)需适应于矿体侧伏特征。依据矿体侧伏规律合理布置采矿工程，降低贫化损失，延长矿山服务年限。因此，精准把握矿体(群)侧伏特征是实现深部高效勘查、经济开采和资源最大化利用的重要依据。

关于矿体侧伏规律研究，Sibson(1987，1996)系统论述了断裂力学性质与矿化空间的关系，奠定了侧伏规律理论基础；邓军等(2006)、华仁民等(2005)等专家通过中国重要矿床的侧伏规律研究，取得明显的找矿效果；Cline et al.(2005)解析了卡林型金矿床褶皱控矿侧伏规律；Maughan et al.(2002)揭示了斑岩系统矿体侧伏机制；Cox et al.(2001)建立了断裂-流体耦合模型，论证了矿体侧伏方向与构造应力场关联性；陈国达(1978)指出成矿期共轭节理反映的中间主应力方向(σ_2)可指示矿体侧伏方向；汪劲草等(2006)认为脉型和蚀变岩型两类矿体，其侧伏向和侧伏角与成矿时的主构造应力(σ_1)密切相关，提出了主动侧伏和被动侧伏的概念；高秋斌等(1998)认为，矿体侧伏主要受断裂构造两盘相对运动过程中产生的启张空间的侧伏制约。

针对明显受构造控制的热液矿床，在矿体侧伏规律及其控制因素研究中，既往研究多依据矿体垂直纵投影图和矿化蚀变分布特征的经验判别，或者从构造应力场等角度分析。但是，热液矿床中不同类型断裂构造控制的矿体(群)侧伏规律及其机制研究中还存在如下主要问题。①多期构造叠加导致矿体侧伏识别困难。从多期构造中筛分出成矿期构造，其本身就是研究难题之一(韩润生等，2020，2025a)，而且成矿后构造改造(如褶皱、断裂构造叠加)常掩盖成矿期矿体的侧伏方向，导致规律误判(Groves and Vearncombe, 2020)。如华南钨矿床因燕山期断裂叠加，早期矿体侧伏方向部分偏移(华仁民等，2005)。②矿体群侧伏控制机制不清与定位量化研究不足。同一成矿期内不同方向、不同类型断裂构造控制的单个矿体和矿体群侧伏规律不完全一致，矿体群侧伏的控制机理缺乏深入研究，致使深部单个矿体尖灭后便无迹可寻，难以快速确定隐伏矿体群三维空间延深规律，从而导致深部找矿方向不明，造成人力、物力和财力浪费。③水岩相互作用量化研究不足。在成矿过程中成矿流体的压力、浓度梯度对扩容空间定位的影响难以定量模拟(Cox and Ruming, 2004)，围岩渗透性非均质性(如脆性/韧性转换带)控制侧伏角变化的机理尚不明确(Zhang et al., 2019)。④浅部勘查数据存在局限性，深部矿体侧伏实证研究不足。浅部工程控制程度高，而深部数据稀疏导致侧伏模型外推不确定性增大(Woodall, 1994)，矿体边界识别误差(如品位渐变部位)影响精确测定侧伏方向；深部验证工程成本增高，有关侧伏模型缺乏实证(如超1000 m深部预测矿体的见矿率<30%；Knox-Robinson, 2000)。⑤动力学模型需要完善。现有构造模型多假设静态应力场，忽略成矿期应力场瞬态变化(如地震泵吸现象)对矿体侧伏方向的影响(Sibson, 1996)。因此，矿体侧伏研究是连接成矿理论与找矿勘查实践的桥梁。文章基于矿田地质力学理论与方法(孙家骢和韩润生，2016)，突破多期构造识别、矿体群侧伏控制机制等瓶颈，论述了不同类型断裂构造控制的热液矿床矿体(群)侧伏规律及其机制，并提出其矿体(群)侧伏确定方法，用于直接指导深部找矿部署和探采工程布置，这将显著提高深部找矿效率，助推矿床勘查理论发展。

1　不同类型构造控制的矿体（群）表现形式与侧伏规律

热液矿床中矿体(群)的侧伏，其表现方式有所不同，侧伏方向和侧伏角并非随机，而是严格受控于成矿期主导性成矿构造的力学性质、运动学特征及空间组合(韩润生和张艳，2025)。针对不同尺度构造控制的矿体群或矿化带、矿体和矿脉群，构建特征鲜明的侧伏模式是深部隐伏矿预测的关键(韩润生和张艳，2025)。

1.1　矿体（群）侧伏形式

(1)单个矿体侧伏：单个矿体(尤其是脉状、柱状、透镜状矿体)沿走向延伸时，其最厚、最富部位(矿柱)并非垂直向下延深，而是向侧伏方向倾斜下延。

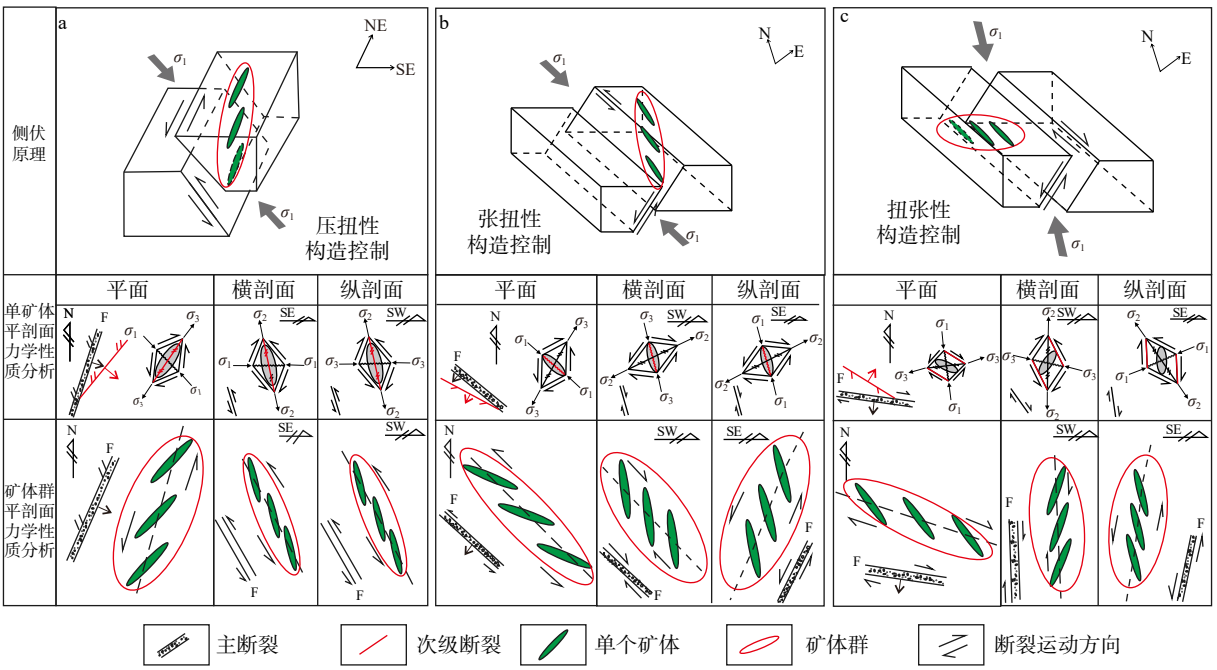
(2)矿体群侧伏：在矿田或矿床范围内，多个平行或近平行的矿体(脉)在空间上呈斜列式分布(Han et al., 2024, 2025b)，这些矿体(脉)组成的矿体群整体向同一方向侧伏，形成矿带或矿体群侧伏。这是值得关注的侧伏形式。

(3)矿化中心侧伏：整个矿化蚀变系统的中心或强度中心沿一定方向倾斜延深。

1.2　压扭性/扭压性断裂带控制的矿体（群）侧伏规律

该类断裂构造具有走滑分量(左行/右行)特征。总体来说，相较于压扭性断裂，扭压性断裂控制的矿体侧伏更为显著，且侧伏角通常更小。压扭性断裂面在平面或剖面常呈舒缓波状，往往是热液矿床的主控构造，其控制的矿体(脉)群在平面上呈斜列式分布的串珠状透镜体，并伴有分支复合现象；而在剖面上呈“缓宽陡窄”、斜列式侧伏延深，其延深大于走向延长、单体规模大且较稳定，矿石呈条带状构造、分支复合明显。其侧伏规律如下。

(1)侧伏方向受断裂扭动方向直接控制。矿体(群)侧伏方向与断裂下降盘运动方向一致：左行扭动断裂带控制的矿体(群)向左侧伏(图 1a)；右行扭动断裂带控制的矿体(群)向右侧伏。如滇东北矿集区会泽、毛坪富锗铅锌矿床受北东向左行压扭性断裂控制，导致其矿体(群)均向南西侧伏(图 2a—2c)；滇西核桃坪夕卡岩型铅锌矿床受北北东向右

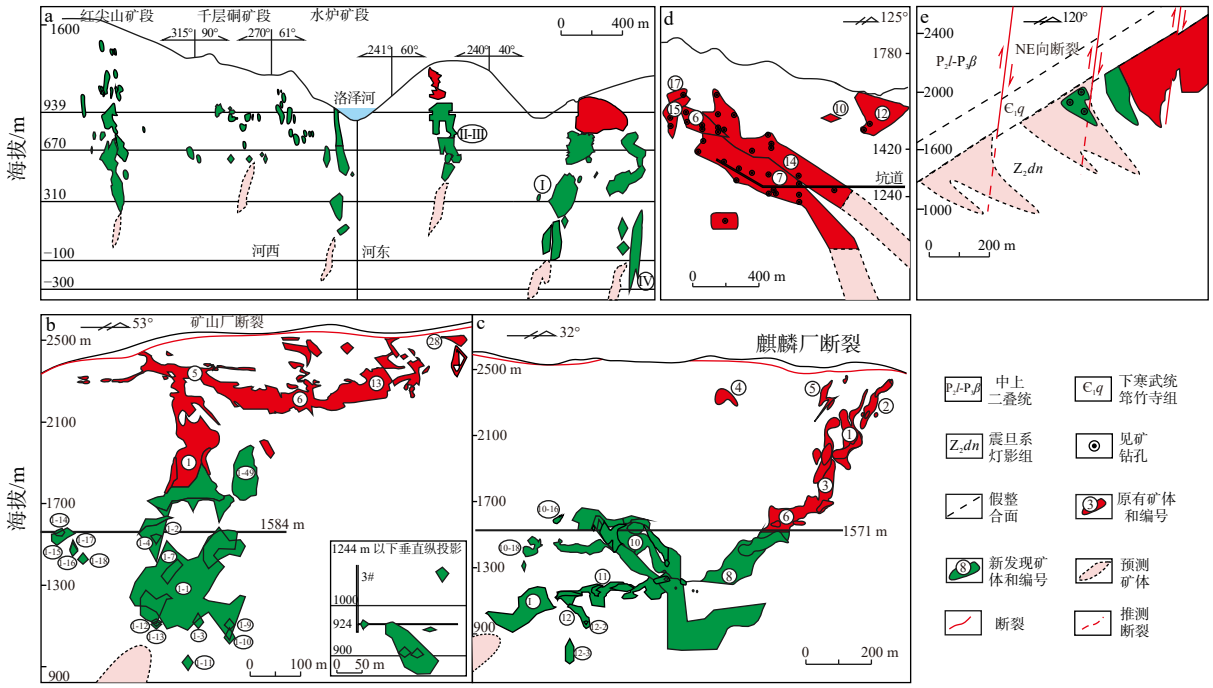


a—压扭性断裂控制的矿体(群)侧伏规律和力学机制示意图；b—张扭性断裂控制的矿体(群)侧伏规律和力学机制示意图；c—扭张性断裂控制的矿体(群)侧伏规律和力学机制示意图

图 1　不同类型断裂带控制的矿体（群）侧伏规律和力学机制示意图

Fig. 1　Schematic diagrams of ore body (cluster) plunge law and mechanical mechanisms controlled by different types of fault zones

(a) Schematic diagrams of ore body (cluster) plunge law and mechanical mechanisms controlled by compresso–shear fault structure; (b) Schematic diagrams of ore body (cluster) plunge law and mechanical mechanisms controlled by tensional-shear fault structure; (c) Schematic diagrams of ore body (cluster) plunge law and mechanical mechanisms controlled by shear-tensional fault structure



a—毛坪铅锌矿床的矿体(群)纵投影图；b—会泽矿山厂铅锌矿床的矿体(群)纵投影图；c—会泽麒麟厂铅锌矿床的矿体(群)纵投影图；d—杉树林铅锌矿床的矿体(群)纵投影图；e—大梁子铅锌矿床的矿体(群)纵投影图

a—c为压扭性断裂控制的矿体群侧伏典例，d为张扭性断裂控制的矿体群侧伏典例，e为扭张性断裂控制的矿体群侧伏典例

图2 川滇黔典型铅锌矿床的矿体（群）纵投影图（据韩润生和张艳，2025修改）

Fig. 2 Longitudinal projection of ore bodies (clusters) in typical lead-zinc deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou region (modified from Han and Zhang, 2025)

(a) Longitudinal projection of ore bodies (clusters) in the Maoping lead-zinc deposits; (b) Longitudinal projection of ore bodies (clusters) in the Kuangshanchang lead-zinc deposits in Huize; (c) Longitudinal projection of ore bodies (clusters) in the Qilinchang lead-zinc deposits in Huize; (d) Longitudinal projection of ore bodies (clusters) in the Shanshulin lead-zinc deposits; (e) Longitudinal projection of ore bodies (clusters) in the Daliangzi lead-zinc deposits

(a)–(c) show typical examples of plunging ore body clusters controlled by compresso-shear faults; (d) shows typical examples of plunging ore body clusters controlled by tensional-shear faults; (e) shows typical examples of plunging ore body clusters controlled by shear-tensional faults.

行压扭性断裂控制，导致矿体向北北东侧伏。

（2）侧伏角大小受控于成矿断裂倾角、剪切分量、断裂面波状起伏幅度及区域主应力方向。具体来说，高角度含矿断裂（>60°）、扭压性断裂控制的矿体侧伏角较小（10°～45°），而压扭性断裂控制的矿体侧伏角较大（45°～80°），缓倾斜断裂控制的矿体侧伏角也较小；剪切分量越大，侧伏角越小；断裂面波状起伏幅度越大，侧伏角越大。如滇东北矿集区会泽麒麟厂富锗铅锌矿床矿体（群）沿南西向以40°～50°侧伏角向深部延展（图2c；韩润生等，2001；韩润生等，2019）；会泽矿山厂、昭通毛坪富锗铅锌矿床矿体（群）主体沿南西向以75°～80°侧伏角向深部延展（图2a、2b；韩润生等，2019）。

1.3 张扭性/扭张性断裂带控制的矿体（群）侧伏规律

（1）该类断裂带控制的矿体（群）侧伏取决于剪切分量。总体来说，扭张性断裂带比张扭性断裂带控制的矿体群侧伏明显，其侧伏方向与断裂扭动方向直接关联（图1b、1c），单个矿体或矿脉群与矿体群的侧伏向相反，前者与控矿主断裂派生的次级含矿断裂下降盘运动方向一致，而后者与控矿主断裂下降盘运动方向一致。例如，川西南大梁子铅锌矿床，单个矿体或矿脉群受北西西向右行扭张性断裂派生的一组北西向右行张扭性断裂控制，呈南东向侧伏；同一矿化带内矿体群受北西西向右行扭张性主断裂控制，向北西西向侧伏（图2c）。

（2）侧伏角大小受控于成矿断裂倾角、剪切分量强度、断裂面波状起伏幅度及区域主应力方向。具体来说，高角度断裂（>60°）、张扭性断裂控制的矿体侧伏角较大（45°～80°），而扭张性断裂控制的矿体侧伏角较小（10°～45°），缓倾斜断裂控制的矿

体侧伏角也较小；扭动分量越大，侧伏角越小；断裂面波状起伏幅度越大，侧伏角越小；矿体群侧伏方向通常垂直于 σ_2。例如，黔西北杉树林矿床，张扭性含矿断裂控制的矿体侧伏角为 45°～50°（图 2b）；川西南大梁子铅锌矿床，扭张性含矿断裂控制的矿体侧伏角为 35°～45°（图 2e）。

1.4　剪切带或扭性为主的断裂带控制的矿体（群）侧伏规律

（1）剪切带控制的矿体侧伏规律

韧性剪切带构造往往具有规模较大与强烈面理（糜棱叶理）和线理（拉伸线理）的特征，常见于造山带中控制造山型金矿（如胶东焦家式金矿），矿体侧伏受糜棱叶理或拉伸线理主导；脆性剪切带控制的矿体主要受控于剪切带的几何形态与运动学机制。

韧性剪切带控制的矿体侧伏方向平行于拉伸线理方向，而脆性剪切带拉伸方向指示矿体侧伏方向：矿体（尤其是富矿体/矿柱）常顺糜棱叶理面分布，并沿拉伸线理方向延伸，其侧伏角等于拉伸线理的倾伏角（Groves et al., 1998），如焦家金矿富矿柱（邓军等, 2006）；脆性剪切带控制的矿体侧伏方向与其拉伸方向或最大主应力轴（σ_1）的倾伏方向一致；

矿体侧伏受控于剪切运动学特征：在简单剪切作用下，拉伸线理平行于剪切方向；若一般剪切存在压扁分量，线理方向向最大拉伸方向（有限应变椭球体 X 轴）偏转。

侧伏角变化大：从近水平（<10°）到近直立（>80°）均可出现，受控于剪切带的产状、剪切类型（走滑、斜滑）及变形强度。

（2）扭性为主的断裂带控制的矿体（群）侧伏规律

上节已论述了扭张性（图 1c, 图 2e）控矿矿体（群）的侧伏问题，它和扭压性断裂控制的矿体（群）侧伏向主要受主断裂及其派生的次级断裂倾向和力学性质、运动学控制，其侧伏角较小（<45°）。

1.5　复合构造系统控制的矿体（群）侧伏规律

受多期、多类构造叠加（如断裂切割褶皱、剪切带叠加后期断裂构造等）控制的矿床，矿体（群）侧伏规律复杂，关键是要从多期构造中识别和筛分出成矿期构造，反演成矿期控制矿体（群）的局部应力场，分析矿体群空间分布规律。

（1）继承性与叠加性：早期成矿构造（如褶皱枢纽方向、剪切带线理）奠定基础的侧伏方向，后期成矿构造（如断裂扭动）对其进行改造或叠加新的侧伏方向。

（2）主导性：通常成矿期活动最强烈、提供主要通道或空间的构造起主导作用，且决定矿体（群）最终的侧伏方向，因而需要精细解析构造级序和成矿期次。

（3）复杂性：在矿床的不同矿段，矿体侧伏方向可能发生变化，甚至出现反向，可划分区段研究。

综上所述，不同类型断裂构造控制的矿体（群）侧伏与构造力学性质和运动学特征具有成生联系，且成矿断裂倾向影响矿体（群）的侧伏。总体来说，其侧伏方向与成矿断裂带下降盘的运动方向一致，并具有不同的矿产勘探意义（表 1）。

2　矿体（群）侧伏的控制因素与力学机制

2.1　矿体（群）侧伏的主要控制因素

研究认为，矿体（群）侧伏规律受成矿构造应力场、流体动力学与围岩物性共同作用所控制。成矿构造“末端”的应力释放区（中低级序断裂带、构造转换带、构造薄弱带、褶皱虚脱空间和倾伏端或扬起端、次级构造裂隙密集带、断裂尖灭端、不整合

表 1　不同类型断裂构造控制的矿体（群）侧伏规律

Table 1　Ore body (cluster) plunge law of various fault structure types

控矿构造类型	主导控制因素	主要侧伏规律	矿产勘探意义
压扭性/扭压性断裂带	断裂力学性质和扭动方向（右行/左行）及剪切分量	右行扭动→右侧伏；左行扭动→左侧伏	压扭性断裂控制的矿体侧伏规律清晰且普遍，是侧伏预测的主要依据
张扭性/扭张性断裂带	断裂力学性质和扭动方向及剪切分量	张扭性构造控制的矿体（群）侧伏规律性较弱，矿体（群）斜列侧伏或沿通道倾斜延深；扭张性断裂带控制的矿体（群）侧伏规律性较强	结合局部成矿构造与主次断裂力学、运动学分析
剪切带与扭性为主断裂	拉伸线理方向、剪切带伸长方向/扭性为主断裂运动方向	侧伏方向与线理方向一致；侧伏角=线理倾伏角；主断裂及其派生的次级断裂的力学性质、运动学控制矿体（群）侧伏	线理测量、构造力学性质、运动学判断是关键
复合构造	成矿期主导构造	需精细解析继承性、叠加性或转换构造，确定其侧伏方式	划分构造活动和成矿期次，确定成矿期主控构造是关键

面或假整合面等)所形成的低压扩容带，为矿质卸载沉淀提供了“构造圈闭”空间(韩润生和张艳，2025)，在成矿期断裂活动过程所形成的扩容空间与成矿流体发生耦合作用正是矿体(群)侧伏的主要原因。如中低级序的压扭性断裂带在剖面上形成“缓宽陡窄”的扩容空间，导致矿体在断裂变缓处变厚，在变陡处变薄。

(1)构造应力场与断裂作用方式

在热液矿床中，压扭性断裂是控制矿体(群)侧伏最明显的构造类型。在压扭性应力场作用下形成斜冲走滑主断裂及其派生断褶构造，其断裂面常呈舒缓波状，其成矿部位往往是中低级序的压扭性断裂带、褶皱虚脱空间和倾伏端等构造“末端”的应力释放区(韩润生和张艳，2025)，矿体主要定位于成矿断裂带走向、倾向变化部位(如弯曲处、分支交汇部位)或局部应力释放的引张空间(如断层倾角从陡变缓部位等)。同时，先存构造薄弱带(如层理面、片理面、早期构造裂隙等)被后期成矿构造利用和改造，其空间展布也影响矿体(群)的侧伏方式。

矿体侧伏向和侧伏角与断裂的扭动方向直接相关。如在左行压扭性断裂带中矿体(群)通常向左侧伏，而右行压扭性断裂带中矿体(群)通常向右侧伏；侧伏角受控于断裂、倾向和倾角、剪切分量及区域主应力方向的配置。高角度断裂配合强烈扭动，常形成较大的侧伏角。如川滇黔成矿区内的富锗铅锌矿床的矿体(群)侧伏规律已被勘查实践证明(图1，图2)。

在共轭断裂系统中，矿化优先富集于某一组断裂(如张性较强的一组)，该组断裂的扭动性质决定了矿体(群)的侧伏方向。

(2)流体运移和沉淀的动力学

流体运移优势通道：成矿流体倾向于沿着阻力小、渗透性好的通道运移。在断裂系统中，这些优势通道往往具有特定的几何形态和方向性，导致矿质沉淀中心(矿柱)沿该通道方向延伸(深)，形成矿体(群)侧伏。

流体混合与物理化学障：不同性质流体(如深部上升热液与浅部热液)的混合界面、温度/压力梯度带、酸碱度/氧化-还原电位变化带等部位，常是矿质沉淀的有利场所。这些界面在空间上可能倾斜，导致矿体侧伏。

流体卸载沉淀机制：在断裂走向和倾角变化或交汇处，流体流速和压力常发生突变，导致成矿流体卸载沉淀，形成富矿体，其排列方式受成矿构造格局控制而呈现侧伏特征。

(3)围岩的物理化学性质

不同围岩的物理性质(脆韧性、孔隙度、渗透性)和化学性质的差异(Wu et al., 2024)，影响断裂裂隙的发育程度、热液渗透路径及矿化强度分布，从而间接控制了矿体分布及其侧伏特征。

2.2 不同类型构造控制矿体（群）侧伏的力学机制

矿体(群)侧伏是成矿构造应力场与流体输运耦合作用的结果，其侧伏方向与侧伏角由局部应变场中形成的扩容空间排列方向决定(Cox et al., 2001)。

2.2.1 压扭性/扭压性断裂带

压扭性断裂带形成的力学过程已被学者们论证(Sibson, 1987; Hodgson, 1989)。在区域应力场(σ_1水平)作用下，断裂发生右行或左行扭动(图1)，并形成扩容空间。断裂面呈波状弯曲或分支交汇时，斜冲走滑断裂作用产生局部引张区(扩容区)，形成高渗透性通道(Sibson, 1996)。扩容区展布方向(即侧伏方向)与断裂扭动方向和倾伏矢量的合成方向平行(Cox and Ruming, 2004)。研究认为，该类断裂控制的矿体(群)侧伏方向与σ_2方向一致(图1a)。当断裂发生右行压扭/扭压作用时，扩容区沿断裂走向向右下方斜列，导致矿体群向右侧伏；当断裂发生左行压扭/扭压作用时，扩容区向左下方斜列，导致矿体群向左侧伏。因此，该类断裂作用的剪切方向主导了矿体侧伏方式。

2.2.2 张扭性/扭张性断裂带

Curewitz and Karson(1997)论证了张性/张扭性断裂带形成的力学过程。张性断裂带的应力状态呈σ_1近直立(拉张环境)，断裂以垂向张开为主，控制的矿体(群)无侧伏。对于张扭性断裂带，流体通道优选机制为断裂网络中的高角度分支裂隙更易连通，形成大角度优势通道。当流体沿通道上升时，受压力梯度驱动(深部高压→浅部低压)，在通道倾伏方向持续沉淀成矿。优势通道在三维空间中的倾斜延深方向即为侧伏方向，受控于断裂面产状(倾向/倾角)和区域σ_2方向(控制通道走向)。因此，张应力控制优势通道的倾斜或矿体侧伏。

扭张性断裂带控制的矿体和矿体群，在断裂陡倾斜处常产生引张扩容空间，矿液沿该空间充填形成矿体，但其侧伏方向相反(图1b)。因此，断裂扭动方向决定矿液在扩容空间走向延伸方向上的汇

聚趋势。

2.2.3　韧性剪切带

韧性剪切带的力学过程已被学者们论证（Groves et al., 1998; Passchier and Trouw, 2005）：其应变状态表现为，简单剪切变形形成强烈面理（*XY* 面）和拉伸线理（*X* 轴方向）；其控制矿体定位特征表现为，成矿流体沿糜棱叶理面（渗透性各向异性）运移，在 *X* 轴方向（最大拉伸方向）的强应变区沉淀成矿，导致矿体侧伏方向与拉伸线理方向一致；侧伏角与线理倾伏角一致，受剪切作用类型控制，当为走滑剪切时，矿体呈近水平侧伏，当为斜冲剪切，矿体呈中—高角度侧伏。因此，拉伸轴控制了矿体侧伏。

综上所述，矿体（群）侧伏方向是成矿构造应力场中成矿流体最大渗透率方向。压扭性/扭压性断裂带控制的矿体（群）受控于扭动方向；张扭性/扭张性断裂控制的矿体（群）取决于优势通道产状；韧性剪切带控制的矿体（群）服从应变椭球体 *X* 轴方向（表 2）。据此规律，可以准确预测深部矿体具体部位。

表 2　矿体群侧伏的力学机制小结

Table 2　Summary of mechanical mechanisms for ore (body) cluster plunge

成矿构造	主导应力	扩容空间形成机制	侧伏向决定因素	参考文献
压扭性断裂带	压扭应力	断裂扭动在舒缓波状面产生张性阶步、断裂在剖面变缓扩容区	断裂扭动方向 (右行→右侧伏)	Sibson, 1987; 韩润生等, 2001
张扭性或扭张性断裂带	张扭应力或扭张应力	高角度连通裂隙形成流体优势通道	优势通道倾斜方向	Curewitz and Karson, 1997
韧性剪切带	简单剪切	*X*轴方向强应变区渗透性增强	拉伸线理方向 (*X*轴投影)	Groves et al., 1998

3　矿体（群）侧伏确定方法

应用成矿构造解析、矿化蚀变分带趋势追索、勘查工程数据三维空间分析等方法，可以确定矿体（富矿段）的轴向延伸趋势（侧伏）。

3.1　地质标志确定法

（1）成矿构造解析法

压扭性/扭压性、张扭性/扭张性断裂带：测量成矿断裂的擦痕或阶步倾伏向和倾伏角（指示断裂扭动方向），可以预测隐伏矿体侧伏特征。

韧性剪切带：测定拉伸线理产状（Groves et al., 1998）。

据此，提出了热液矿床深部矿体侧伏向和空间定位判定方法（韩润生等, 2023c），其应用前提条件为成矿构造较稳定、力学性质和运动学特征明显且未受后期强烈改造。如滇东北矿集区内以会泽、毛坪富锗铅锌矿为代表的矿床，主矿体展布于北东向断褶带的主断裂上盘左行压扭性层间断裂带中（图 2a—2c），向南西向侧伏；黔西北矿集区中不同矿床的主矿体向南东侧伏，展布于北西向断褶带的主断裂带及其下盘扭张性层间滑动带中（图 2d）；川西南矿集区大梁子富锗铅锌矿床的主矿体定位于近南北向主断裂派生的北西西—东西向右行扭张性断裂带中，单矿体向南东向侧伏，而矿体群向北西西向侧伏（图 2e）。

（2）矿化蚀变分带趋势追索法

在热液成矿过程中，因成矿流体的温压梯度、化学成分变化等多重因素对扩容空间定位的影响，热液蚀变强度和矿化-蚀变分带往往呈现规律性变化（韩润生, 2017），依据该规律追索矿体侧伏方向。如 Pb+Zn/As+Sb+Hg 比值从浅部向深部升高，指示矿体向深部侧伏。

3.2　勘查工程数据空间分析法

（1）矿体中心点投影法：首先，圈定单工程见矿富集段（品位>边界品位 1.5 倍）中心点；其次，将中心点投影至水平面和垂直剖面；最后连接相邻中段中心点，拟合延伸（深）轴线，得到轴线水平投影方向，即侧伏方向。轴线与水平面夹角，即为侧伏角。

（2）等值线趋势法：当矿体形态规则且勘查数据充足时，可制作矿体厚度/品位等值线图，依据等值线长轴方向，推断矿体的侧伏方向。

3.3　构造地球化学异常确定法

构造地球化学勘查是热液矿床找矿预测的有效方法。依据构造地球化学异常空间展布特点，不仅可以圈定重点找矿靶区和具体靶位，还可表征热液矿床（体）的存在性（韩润生等, 2025c, 2025d）；同时，通过对比分析已知矿体分布模型与映射隐伏矿体的构造地球化学异常模型，可以推断深部隐伏矿体的形态和产状特征（韩润生和张艳, 2025）。其中，依据 3 个中段的构造地球化学异常中心的“漂移”方向，可推断隐伏矿体的侧伏特征（Han et

al., 2015)。

在隐伏矿体(群)侧伏判别中,各种侧伏推断方法(表3)的适用阶段、数据要求和精度有所不同。需要关注的是,多期构造叠加干扰、深部预测不确定性及瞬态应力场影响等问题,可通过成矿期主控构造活动时序和三维可视化联合研究,揭示矿体侧伏的形成机制。

表3 矿体侧伏确定方法适用性及其精度对比

Table 3 Comparison of applicability and accuracy for ore body (cluster) Plunge determination methods

确定方法	适用阶段	数据需求	精度	主要局限
成矿构造解析法	预查—普查、深部勘查	地质填图	中	深部控矿构造可能变化
矿体中心点投影法	详查—勘探	≥3个中段工程数据	高	部分揭露矿体
等值线趋势法	勘探—开发	密集网格工程	中—高	受矿体形态复杂性影响
构造地球化学异常法	普查—勘查、勘探	≥3个中段工程数据	中—高	受矿体分布和工程布局影响
物探异常确定方法	勘查—勘探	剖面数据	中	受地形、构造和矿体分布影响

3.4 地球物理异常确定方法

时频电磁法是当前大深度资源探测的有效方法,联合控矿构造解析,不仅可以圈定深部找矿靶区,还可确定隐伏矿体侧伏方向。因文章篇幅限制,再另文论述。

4 矿体(群)侧伏规律在矿产勘查中的应用

4.1 矿床深部和外围隐伏矿预测

依据已知矿体或矿化体侧伏向和侧伏角,可以预测深部盲矿体或矿柱的可能赋存位置,这是深部找矿增储的核心策略之一。在同一矿田或同一成矿系统内,具有相似构造背景的矿体(群)往往遵循一致的侧伏规律。在一个找矿区段研究总结的侧伏规律,可指导相邻区段或类似构造部位的深部找矿勘查工作。

4.2 有效指导勘查工作部署和探矿工程布置

常规的矿产勘查中,勘探线方向按垂直于矿体或主要构造线走向布置,但结果往往事倍功半。在勘查区设计部署勘探线方向和工程网度时,需要整体考虑矿体的侧伏向和侧伏角,勘探线布置应尽可能垂直于矿体侧伏向,有效地控制矿体的主体部位;在探矿钻孔设计时,依据预测的侧伏角及时调整钻孔方位和倾角,使钻孔尽可能穿过矿体中轴线,提高工程见矿率和控制精度;在探矿坑道设计时,也应考虑矿体(群)侧伏规律,避免工程平行于或小角度斜交侧伏方向导致难以控制矿体中心。

4.3 矿体合理连接与资源量估算

研究和总结矿体(群)侧伏规律是建立三维矿体模型的基础。若忽视矿体(群)侧伏,简单地将不同标高见矿点沿铅垂方向连接,往往会歪曲矿体形态和规模,导致资源量估算失实。尤其是对于褶皱构造控制的矿体(群),往往会导致矿体错连、形态和规模误判。

4.4 矿体定位规律研究与靶区优选

矿体(群)侧伏规律是解析热液矿床成矿构造应力场和流体运移路径的重要线索。研究矿田或矿床尺度的矿体(群)侧伏方向,有助于推断控矿断裂的扭动性质和区域主应力方向,进而指导勘查区找矿预测和靶区圈定。

5 结论

准确识别和掌握矿体(群)侧伏规律,是突破“就矿找矿”思维和实现深部找矿突破的关键。在勘查实践中,要将地质填图、成矿构造解析与矿床地质研究紧密结合,准确确定矿体(群)的侧伏方向和侧伏角,并据此科学部署和布置勘查工程、预测深部资源潜力,有望打开找矿新局面以取得事半功倍的效果。

(1)在热液矿床中,不同类型构造控制的矿体(群)侧伏规律虽有所差异,但其本质上受成矿构造的力学、运动学控制,其侧伏向与成矿构造下降盘运动方向一致,而侧伏角受其成矿构造应力场水平分量或成矿构造运动方向与断裂走向的夹角所控制。

(2)矿体(群)侧伏规律受成矿构造应力场、流体动力学与围岩物性共同作用所控制。不同级序构造控制的矿体群和单个矿体的侧伏规律不完全一致:压扭性构造控制的矿体群和单个矿体侧伏向

一致，但张扭性/扭张性断裂控制的矿体群和单个矿体的侧伏方向相反。

(3)针对矿山深部或勘查区隐伏矿定位预测，不同尺度成矿构造解析、矿化蚀变分带追索、矿体中心点投影、勘查工程数据的三维空间分析等方法，是确定隐伏矿体侧伏的主要手段；构造地球化学、地球物理异常分析等方法，可作为深部隐伏矿定位预测的重要手段；有效地推断隐伏矿体(群)侧伏产状，配合矿体三维建模，可提升隐伏矿体预测的可靠性。

致谢：在研究过程中，得到论文评审专家的指导和会泽矿业、彝良驰宏矿业等矿山企业的大力支持，在此一并致谢！

References

CHEN G D, 1978. Research method of ore-forming structures[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

CLINE J S, HOFSTRA A H, MUNTEAN J L, et al. , 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models[M]//HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. One hundredth anniversary volume. Littleton, CO: Society of Economic Geologists: 451-484.

COX S F, KNACKSTEDT M A, BRAUN J, 2001. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems[M]//RICHARDS J P, TOSDAL R M. Structural controls on ore genesis. Society of Economic Geologists: 1-10.

COX S F, RUMING K, 2004. The St Ives mesothermal gold system, Western Australia—a case of golden aftershocks?[J]. Journal of Structural Geology, 26(6-7): 1109-1125.

CUREWITZ D, KARSON J A, 1997. Structural settings of hydrothermal outflow: fracture permeability maintained by fault propagation and interaction[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 79(3-4): 149-168.

DAVIES A J, HAGEMANN S G, WITT W K, et al., 2025. Structural controls on Au–Co mineralisation at the Juomasuo deposit, an example of Paleoproterozoic Au–Co–Cu–REE systems in the Karelian belts of Scandinavia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 72(5-6): 732-762.

DENG J, YANG L Q, GE L S, et al., 2006. Research advances on the tectonic regime of the Jiaodong mineral concentration area formation[J]. Progress in Natural Science, 16(5): 513-518. (in Chinese with English abstract)

GAO Q B, FAN Y X, WANG K Y, et al., 1998. The main geological means of deep metallogenetic prognosis of gold deposits[J]. Gold Geology, 4(2): 22-26. (in Chinese with English abstract)

GROVES D I, GOLDFARB R J, GEBRE-MARIAM M, et al., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 13(1-5): 7-27.

GROVES D, VEARNCOMBE J, 2020. Introduction: thematic issue of *Mineralium deposita* on orogenic gold deposits[J]. Mineralium Deposita, 55(2): 187-188.

HAN R S, CHEN J, LI Y, et al., 2001. Ore-controlling tectonics and prognosis of concealed ores in Huize Pb-Zn deposit, Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 21(2): 265-269. (in Chinese with English abstract)

HAN R S, CHEN J, WANG F, et al., 2015. Analysis of metal-element association halos within fault zones for the exploration of concealed ore-bodies: a case study of the Qilinchang Zn-Pb-(Ag-Ge) deposit in the Huize mine district, northeastern Yunnan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 159: 62-78.

HAN R S, 2017-01-04. Large-scale alteration lithofacies positioning and predicating method for hydrothermal deposit: CN, 104156601B[P]. (in Chinese)

HAN R S, ZHANG Y, WANG F, et al. , 2019. Metallogenic mechanism and concealed ore location prediction of germanium-rich lead-zinc deposits in northeastern Yunnan ore concentration area[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

HAN R S, WANG M Z, JIN Z G, et al., 2020. Ore-controlling mechanism of NE-trending ore-forming structural system at Zn-Pb polymetallic ore concentration area in northwestern Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 94(3): 850-868. (in Chinese with English abstract)

HAN R S, ZHAO D, 2022. Research methods for the deep extension pattern of rock/ore-controlling structures of magmatic-hydrothermal ore deposits: a preliminary study[J]. Earth Science Frontiers, 29(5): 420-437. (in Chinese with English abstract)

HAN R S, WU P, ZHANG Y, et al., 2022. New research progress in metallogenic theory for rich Zn-Pb-(Ag-Ge) deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou Triangle (SYGT) area, southwestern Tethys[J]. Acta Geologica Sinica, 96(2): 554-573. (in Chinese with English abstract)

HAN R S, ZHAO D, LIU F, et al. , 2023a-10-27. Method for determining deep extension pattern of rock and ore control structure of magma hydrothermal polymetallic ore field or ore deposit: CN, 115128698B[P]. (in Chinese)

HAN R S, ZHANG Y, ZHOU G M, et al. , 2023b-08-18. Determination method for ore control structure depth extension pattern of structure-controlled metatherm ore deposit: CN, 115016015B[P]. (in Chinese)

HAN R S, ZHAO D, WANG M Z, 2023c-07-28. Method for determining lateral volt orientation and spatial positioning of deep ore body of hydrothermal polymetallic deposit: CN, 115113297B[P]. (in Chinese)

HAN R S, WU J B, ZHANG Y, et al., 2024. Oblique distribution patterns and the underlying mechanical model of orebody groups controlled by structures at different scales[J]. Scientific Reports, 14(1): 4591.

HAN R S, ZHANG Y, 2025. A preliminary discussion on the mineral exploration system theory: control-mapping exploration system architecture for hydrothermal deposits[J]. Earth Science Frontiers, 32(5): 1-27. (in

Chinese with English abstract)

HAN R S, LIU F, ZHANG Y, 2025a. Discussion on ore-controlling roles of structural system in hydrothermal metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 32(2): 371-389. (in Chinese with English abstract)

HAN R S, WU J B, CHEN Q, et al. , 2025b-03-18. Structure-controlled hydrothermal deposit hidden ore body space skew determination and deep prospecting target determination method: CN, 117784281B[P]. (in Chinese)

HAN R S, ZHANG Y, CHEN Q, et al. , 2025c-03-18. Method for rapidly determining the existence of deep concealed ore bodies in hydrothermal deposits and delineating their occurrence location: CN, 2024 1 0551556.3[P]. (in Chinese)

HAN R S, ZHANG Y, LI W Y, et al. , 2025d-01-21. A characteristic element combination anomaly derivative method for determining the occurrence of deep tabular blind ore bodies in hydrothermal deposits: CN, 2024 1 0551629.9[P]. (in Chinese)

HODGSON C J, 1989. The structure of shear-related, vein-type gold deposits: a review[J]. Ore Geology Reviews, 4(3): 231-273.

HUA R M, CHEN P R, ZHANG W L, et al., 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. Mineral Deposits, 24(2): 99-107. (in Chinese with English abstract)

KNOX-ROBINSON C M, 2000. Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 47(5): 929-941.

LUTZ B M, 2023. Orogenic gold in the Blue Mountains, eastern Oregon, USA[J]. Ore Geology Reviews, 154: 105310.

MAUGHAN D T, KEITH J D, CHRISTIANSEN E H, et al., 2002. Contributions from mafic alkaline magmas to the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, USA[J]. Mineralium Deposita, 37(1): 14-37.

PASSCHIER C W, TROUW R A J, 2005. Microtectonics[M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer.

SIBSON R H, 1987. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems[J]. Geology, 15(8): 701-704.

SIBSON R H, 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes[J]. Journal of Structural Geology, 18(8): 1031-1042.

SUN J C, HAN R S, 2016. Theory and method of Orefield geomechanics[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

VEARNCOMBE J R, 2023. Function and status of structural geology in the Resource industry[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 70(7): 908-931.

WANG J C, WANG R R, ZHOU Y, et al., 2006. Regularity and geological significance for lateral trending of orebodies[J]. Journal of Guilin University of Technology, 26(3): 305-309. (in Chinese with English abstract)

WOODALL R, 1994. Empiricism and concept in successful mineral exploration[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 41(1): 1-10.

WU J B, HAN R S, ZHANG Y, et al., 2024. Porosity-permeability characteristics and mineralization-alteration zones of the Maoping germanium-rich lead-zinc deposit in SW China[J]. Frontiers in Earth Science, 12: 1347243.

XUAN D N, TRONG T P, HAI S T, et al., 2024. 3D models for hydrothermal copper ore bodies at Sin Quyen deposit, North Vietnam: a case report for ore reserves and prediction of hidden mineral resource potential[J]. Heliyon, 10(12): e33017.

ZHANG L, YE Z W, HUANG M Q, et al., 2019. Characteristics of bituminous coal permeability response to the pore pressure and effective shear stress in the Huaibei coalfield in China[J]. Geofluids, 2019: 5489051.

附中文参考文献

陈国达，1978. 成矿构造研究法[M]. 北京：地质出版社.

邓军，杨立强，葛良胜，等，2006. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展[J]. 自然科学进展，16(5)：513-518.

高秋斌，范永香，王可勇，等，1998. 金矿床深部成矿预测的主要途径[J]. 黄金地质，4(2)：22-26.

韩润生，陈进，李元，等，2001. 云南会泽铅锌矿床构造控矿规律及其隐伏矿预测[J]. 矿物学报，21(2)：265-269.

韩润生，2017-01-04. 一种热液矿床的大比例尺蚀变岩相定位预测方法：中国，104156601B[P].

韩润生，张艳，王峰，等，2019. 滇东北矿集区富锗铅锌矿床成矿机制与隐伏矿定位预测[M]. 北京：科学出版社.

韩润生，王明志，金中国，等，2020. 黔西北铅锌多金属矿集区成矿构造体系及其控矿机制[J]. 地质学报，94(3)：850-868.

韩润生，赵冻，2022. 初论岩浆热液成矿系统控岩控矿构造深延格局研究方法[J]. 地学前缘，29(5)：420-437.

韩润生，吴鹏，张艳，等，2022. 西南特提斯川滇黔成矿区富锗铅锌矿床成矿理论研究新进展[J]. 地质学报，96(2)：554-573.

韩润生，赵冻，刘飞，等，2023a-10-27. 确定岩浆热液型多金属矿田或矿床控岩控矿构造深延格局的方法：中国，115128698B[P].

韩润生，张艳，周高明，等，2023b-08-18. 受构造控制的后生热液矿床控矿构造深延格局的确定方法：中国，115016015B[P].

韩润生，赵冻，王明志，2023c-07-28. 确定热液型多金属矿床深部矿体侧伏向和空间定位的方法：中国，115113297B[P].

韩润生，张艳，2025. 初论矿产勘查系统理论：热液矿床控制：映射勘查系统架构[J]. 地学前缘，32(5)：1-27.

韩润生，刘飞，张艳，2025a. 论热液成矿系统中构造体系控矿作用[J]. 地学前缘，32(2)：371-389.

韩润生，吴建标，陈青，等，2025b-03-18. 受构造控制的热液矿床隐伏矿体空间斜列判定和深部找矿定靶的方法：中国，117784281B[P].

韩润生，张艳，陈青，等，2025c-03-18. 快速判定热液矿床深部隐伏矿体存在性和圈定其赋存部位的方法：中国，202410551556.3[P].

韩润生，张艳，李文尧，等，2025d-01-21. 一种确定热液矿床深部板状盲矿体产状的特征元素组合异常导数法：中国，202410551629.9[P].

华仁民，陈培荣，张文兰，等，2005. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. 矿床地质，24(2)：99-107.

孙家骢，韩润生，2016. 矿田地质力学理论与方法[M]. 北京：科学出版社.

汪劲草，王蓉嵘，周瑶，等，2006. 矿体的侧伏规律及其地质意义[J]. 桂林工学院学报，26(3)：305-309.

第一作者简介：

韩润生，昆明理工大学二级教授、博士生导师，享受国务院特殊津贴，入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选、教育部新世纪优秀人才、云岭学者等。现任云南省矿产资源预测评价工程研究中心主任、云南省地质过程与矿产资源创新团队首席教授。长期从事成矿动力学与隐伏矿预测、矿床学方向的教学与研究工作。主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金（重点）项目、科技支撑计划课题、国家危机矿山专项及教育部、财政部、省级和校企科技合作项目 50 余项；以第一或第二作者出版专著 5 部；在 *Scientific Report*、*Ore Geology Reviews*、《地学前缘》《地质学报》等中外刊物发表学术论文 200 余篇；获发明专利授权 22 件；获省部级特等奖 1 项（R1）、一等奖 6 项（4R1、2R2)、二等奖 5 项（2R1、1R2、2R6），并获得中国产学研合作创新奖及第三届“黄汲清青年地质科学技术奖”等。兼任国际大地构造与成矿委员会委员、中国地球物理学会构造物理化学委员会副主任、中国岩石矿物地球化学学会理事、应用地球化学委员会副主任、矿床地球化学委员会委员、中国有色地质学术委员会副主任等。

通信作者简介：

张艳，昆明理工大学教授、博士生导师，兼任中国有色金属学会地质专业委员会副秘书长，入选“云南省兴滇英才支持计划”产业创新、青年人才项目，现任云南省矿产资源预测评价工程研究中心副主任。主要从事隐伏矿预测与矿床学的教学与科研工作。主持深地国家重大专项子课题、国家自然科学基金（面上、青年）项目、博士后面上一等资助项目共 4 项，以及省重大专项课题、产学研合作重点项目等 10 余项。科研成果获云南省科技进步特等奖 1 项（R6），其它省部级科技奖励 4 项、地厅级奖励 2 项，获国家发明专利授权 10 项。以第一作者或通信作者发表高水平论文 50 余篇，作为第二作者出版 78 万字学术专著 1 部。曾获全国大学青年教师地质课程教学比赛一等奖、昆明理工大学首届课程思政教学比赛特等奖。